

SÉRIE U
N° D'ORDRE :
96

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

Mention : *SCIENCES*

PAR

L. FRAICHET

1^{re} THÈSE

L'AIMANTATION ET LES DÉFORMATIONS MOLÉCULAIRES D'UN BARREAU D'ACIER
SOU MIS A LA TRACTION

2^e THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Soutenues le

9 MARS 1932

, devant la Commission d'Examen

Jury : { MM. Pierre WEISS, Président
G. RIBLAUD }
G. FOËX } Examineurs

1932.

SÉRIE U
N° D'ORDRE :
96

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

Mention : SCIENCES

PAR

L. FRAICHET

1^{re} THÈSE

L'AIMANTATION ET LES DÉFORMATIONS MOLÉCULAIRES D'UN BARREAU D'ACIER
SOUMIS A LA TRACTION

2^e THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Soutenues le

9 MARS 1932

, devant la Commission d'Examen

Jury . . { MM. Pierre WEISS, Président
G. RIBEAUD }
G. FOËX } Examinateurs

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

MM.

Doyen E. ROTHÉ Professeur de Physique du globe.

Doyens honoraires E. BATAILLON, P. Th. MULLER.

Professeurs honoraires .. FRÉCHET, G. FRIEDEL, GAULT, GIGNOUX, H. VILLAT.

<i>Professeurs</i>	{	G. VALIRON.....	Analyse supérieure.
		P. WEISS.....	Physique générale.
		H. OLLIVIER.....	Physique générale.
		L. HACKSPILL.....	Chimie minérale.
		E. TOPSENT.....	Zoologie et anatomie comparée.
		C. HOUARD.....	Botanique.
		E. TERROINE.....	Physiologie générale.
		J. DE LAPPARENT.....	Minéralogie et pétrographie.
		E. CHATTON.....	Biologie générale.
		R. THIRY.....	Mécanique rationnelle.
		G. CERF.....	Calcul différentiel et intégral.
		G. DUBOIS.....	Géologie et paléontologie.
		G. RIBAUD.....	Physique expérimentale.
		P. FLAMANT.....	Mathématiques générales.
		E. CORNEC.....	Chimie générale.
		M. FAILLEBIN.....	Chimie organique.
		A. DANJON.....	Astronomie.
		P. DE BEAUCHAMP.....	Biologie générale.
		L. BOUNOURE.....	Zoologie.
		G. FOEX.....	Physique générale.
H. CHERMEZON.....	Botanique.		
G. REMPP.....	Physique du Globe.		
R. ROMANN.....	Chimie physique et électrochimie.		
J. LACOSTE.....	Physique du Globe.		
H. MILLOUX.....	Mathématiques.		

<i>Maîtres de conférences</i> ..	{	Ch. STAEHLING.....	Chimie appliquée.
		G. HUGEL.....	Chimie du pétrole.
		H. WEISS.....	Physico-chimie du pétrole.
		P. SOLLEILLET.....	Physique mathématique.
		R. BONNET.....	Physique et chimie biologiques.
		J. JUNG.....	Géologie du pétrole.
		A. ROUSSEL.....	Mathématiques générales.
		A. CHRÉTIEN.....	Chimie appliquée.
		J. MARESQUELLE.....	Botanique.
		H. CARTAN.....	Mathématiques.
N.....	Minéralogie.		

Secrétaire G. CUVIER.



L'AIMANTATION ET LES DÉFORMATIONS
MOLÉCULAIRES

d'un barreau d'acier soumis à la traction

MÉTHODE D'ESSAI MAGNÉTIQUE
COMPLÉTANT L'ESSAI ORDINAIRE DE TRACTION

TABLE DES MATIÈRES

ARTICLES

PAGES

AVANT-PROPOS	5
----------------------	---

I. — ESSAI ORDINAIRE DE TRACTION

1. Limite élastique	9
2. Limite élastique vraie	11
3. Palier de la charge	11
4. Charge de plasticité	11
5. Charge maximum	12
6. Striction	12
7. Écrouissage	12
8. Insuffisance de l'essai ordinaire de traction	12
9. Nécessité d'une détermination plus scientifique de la limite élastique	13

II. — ESSAI MAGNÉTIQUE

10. Dispositif expérimental et principe de la méthode employée	14
11. Vibration du barreau pendant la traction	17
12. Influence de la grandeur de la force magnétisante	18
13. Cause de la variation du flux pendant la traction ou la décharge d'un barreau.	20
14. Aimantation d'un barreau écroui	20
15. Forme des diagrammes	21
16. Aimantation à la décharge d'un barreau écroui ou non écroui à la traction.	23
17. Hystérésis magnétique.	24

III. — CAS GÉNÉRAL DE L'AIMANTATION A LA TRACTION

18. Période élastique	27
19. Disparition de l'entrefer	27
20. Apparition des déformations permanentes	28
21. Maximum de la courbe de traction	28
22. Expression de la variation du flux	29
23. Période des petits allongements permanents	30
24. Limite de proportionnalité	33
25. Tableau des limites élastiques	35
26. Palier de la charge	36
27. Période d'écrouissage	36
28. Période de striction	38
29. Rupture	38
30. Résumé de cette étude	39

AVANT-PROPOS

Il suffit de tirer sur un barreau, au delà de sa limite élastique, et de l'approcher d'une aiguille aimantée pour constater qu'il est aimanté.

D'autre part, rien que pour leur service, toutes les mordaches des machines à traction sont aimantées.

On peut donc en conclure que la traction développe, dans les barreaux, de l'aimantation qui se transmet, par contact, aux mordaches, lesquelles, étant en acier trempé, deviennent des aimants permanents.

Dans une machine verticale, la mordache supérieure accuse, toujours, un pôle N. tandis que la mordache inférieure accuse, toujours, un pôle S. C'est une polarité inverse que l'on constate sur le barreau, lorsqu'il est retiré de la machine : N en bas et S en haut. L'aimantation produite par la traction est donc orientée comme le champ terrestre, dont la composante verticale est dirigée vers le bas, dans notre hémisphère. Lorsqu'on connaîtra les lois qui régissent cette aimantation, on pourra reconnaître la nature des déformations moléculaires, sur un diagramme donnant l'aimantation en fonction de l'allongement du barreau et compléter, parfois, l'essai ordinaire de traction.

Nos travaux sur la question ont été exécutés en trois séries. Mais, toutes nos expériences ont été faites avec le même dispositif, rappelé plus loin; elles ont toujours fait l'objet d'une interprétation de l'« essai magnétique ».

Cette interprétation a dû souvent être modifiée, par suite de l'apparition d'un fait nouveau. Les phénomènes magnétiques, en général, sont d'une telle complexité que leur analyse nécessite de très laborieuses recherches.

La présente étude a pour objet la relation qui existe entre l'aimantation et les déformations moléculaires d'un barreau soumis à la traction, sans préciser le phénomène physique auquel cette aimantation est due.

BIBLIOGRAPHIE

C'est en 1902 que nous avons eu l'idée d'étudier les déformations moléculaires d'un barreau d'acier soumis à la traction par la variation de son aimantation au cours de l'essai. Nos premières expériences, effectuées au Laboratoire d'Essais mécaniques de la Manufacture d'Armes de Saint-Etienne, ont fait l'objet des communications suivantes :

A L'ACADÉMIE DES SCIENCES : *Variation de la perméabilité magnétique d'un barreau d'acier soumis à la traction* (octobre 1902); *Essai des métaux magnétiques* (novembre 1902); *Etude sur les déformations moléculaires d'un barreau d'acier soumis à la traction* (juin 1903); *Nouvelle méthode d'essai des métaux magnétiques* (juin 1903); *Relation entre la variation de la reluctance et la variation de l'effort extérieur d'un barreau d'acier soumis à la traction* (septembre 1903).

A L'ASSOCIATION INTERNATIONALE DES MÉTHODES D'ESSAIS : *Variation de la perméabilité magnétique d'un barreau d'acier soumis à la traction* (séance du 31 mars 1903).

A L'ECLAIRAGE ELECTRIQUE : a) *Nouvelle méthode d'essai des métaux magnétiques* (juin 1903); b) *Etude sur les déformations moléculaires d'un barreau d'acier soumis à la traction* (juin 1903).

Tous les essais relatés dans ces communications ont été faits avec l'appareillage suivant :

Machine à traction, système Maillard, d'une puissance de 50 t., actionnée par un moteur électrique donnant une vitesse de traction régulière et sensiblement constante;

Bobine d'induction comprenant 300 tours au primaire et 5.500 tours au secondaire ;

Accumulateur donnant un courant constant au cours de l'essai. Un rhéostat permettait de faire des essais avec des intensités de courant différentes, variant de 0 à 4 ampères;

Galvanomètre ordinaire Despretz-d'Arsonval, utilisé, d'autre part, pour la mesure des températures.

Les diagrammes d'essai magnétique étaient construits par points, en portant les temps en abscisses et les déplacements du spot sur la règle du galvanomètre en ordonnées. Les temps étaient enregistrés à l'aide d'un appareil télégraphique Morse.

Les courbes représentent la variation de l'aimantation du barreau, dans ses grandes lignes; mais on peut leur reprocher un défaut de précision dû, surtout, à leur construction par points.

En 1904, nous avons repris nos essais magnétiques à l'Atelier de Construction de Puteaux, en utilisant une bobine plus puissante, comprenant 15.000 tours au secondaire. Mais les courbes ont encore été construites par points. Ces essais ont fait l'objet des communications suivantes :

A L'ACADÉMIE DES SCIENCES : *Relation entre la variation de la perméabilité magnétique d'un barreau d'acier soumis à la traction et la formation des « Lignes de Lüders »* (février 1904).

A LA REVUE D'ARTILLERIE : *Etude sur les déformations moléculaires d'un barreau d'acier soumis à la traction. Essai des métaux magnétiques. Limite élastique vraie* (avril 1904).

En 1921, de nouvelles séries d'essais ont été faits à la *Section technique de l'Artillerie*, avec un outillage bien au point, en enregistrant photographiquement les déplacements du spot du galvanomètre.

Ces derniers essais ont paru : 1° Dans les numéros d'avril et août 1922 de la *Revue de Métallurgie* et les comptes rendus des séances du 4 novembre 1922 et 16 juin 1923 de l'*Association Franco-Belge pour l'essai des Matériaux*, sous les titres : a) *Aimantation et déformations moléculaires de l'acier à la traction. Limite élastique* ; b) *Essai magnétique des aciers à la traction. Limite élastique*.

2° Dans le premier numéro de 1923 du *Mémorial de l'Artillerie Française*, sous le titre : *Aimantation de l'acier à la traction et magnétisme terrestre*.

3° Dans les numéros d'août et septembre 1923 de la *Revue d'Artillerie*, sous les titres : a) *Déformations moléculaires des métaux à la traction. Variation de la perméabilité magnétique et de la conductibilité électrique* ; b) *Auto-aimantation de l'acier à la traction. Limite élastique vraie*.

EXPÉRIENCES POSTÉRIEURES A CES COMMUNICATIONS : Elles ont été effectuées, en 1923, à la *Section technique de l'Artillerie*, sur soixante éprouvettes d'acier fournies par les Aciéries d'Imphy.

CHAPITRE PREMIER

ESSAI ORDINAIRE DE TRACTION

Cet essai a pour but de déterminer : la limite élastique, la charge maximum et l'allongement en pour cent d'un barreau.

La machine à traction permet d'obtenir un diagramme qui représente la charge en fonction de l'allongement.

Ce diagramme est toujours de l'un des trois types représentés par la figure (a) ⁽¹⁾.

1. Limite élastique.

La limite élastique vraie, E , n'est pas indiquée sur ces diagrammes; la limite des allongements proportionnels ou *limite de proportionnalité* est un point E' où le diagramme se sépare de la ligne droite; la *limite apparente* est au point E_1 , où le diagramme change nettement et, parfois, brutalement de direction.

La limite de proportionnalité correspond au début des petits allongements permanents; elle est, le plus souvent, mal déterminée.

La limite apparente correspond au début des grands allongements permanents et est indiquée par la machine à traction : soit, par une chute du levier, de l'aiguille ou du manomètre, indicateurs des charges (aciers ordinaires recuits, type A); soit, par un ralentissement dans la montée de la charge (aciers écrouis par traction, type B) et, dans ce cas, elle se confond avec la limite de proportionnalité; mais elle peut aussi faire défaut (aciers énergiquement trempés et certains aciers spéciaux, même recuits, type C ⁽²⁾).

(1) La partie droite du diagramme correspond à la période des allongements purement élastiques. Pour une charge unitaire p , on a :

$$\Delta l = l \frac{p}{E}$$

E désignant le coefficient d'élasticité, toujours voisin de 20.000, chez les aciers.

Pour $l = 120$ mm. et $p = 50$ kg, on a :

$$\Delta l = 120 \frac{50}{20.000} = 0 \text{ mm } 3.$$

Les barreaux généralement employés ont les dimensions suivantes :

Diamètre : 13 mm. 8 (section : 150 mm²);

Longueur entre les têtes : 120 mm. — Distance entre les repères $\approx$ 100 mm.

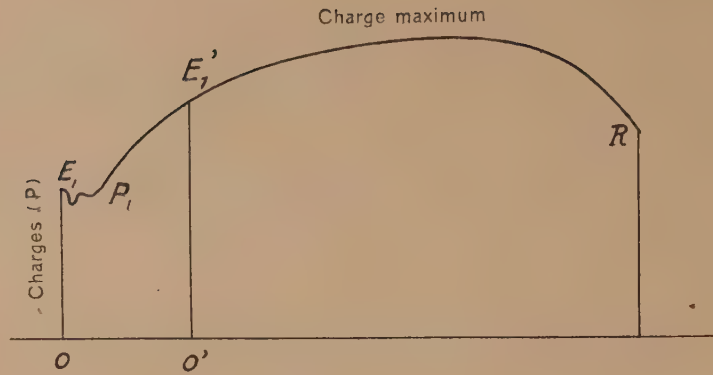
L'allongement élastique total de ces barreaux ne dépasse jamais quelques dixièmes de millimètre. Il en résulte qu'à l'échelle des diagrammes, cet allongement est inappréciable : le diagramme ne s'écarte pas plus de la verticale que l'épaisseur du trait, pendant toute la période élastique.

(2) Chez les aciers du type C, la détermination de la limite élastique manque complètement de précision parce que les allongements permanents débutent insensiblement et augmentent progressivement et régulièrement.

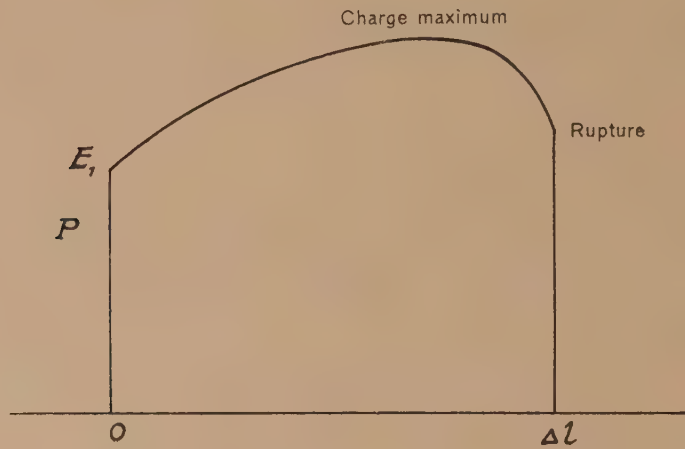
Type A
(aciers recuits)

OE₁R. - Diagramme d'un barreau recuit.

O'E₁'R. - Diagramme du même barreau soumis préalablement à une charge E₁', puis déchargé.



Type B
(aciers écrouis)



Type C
(aciers énergiquement trempés)

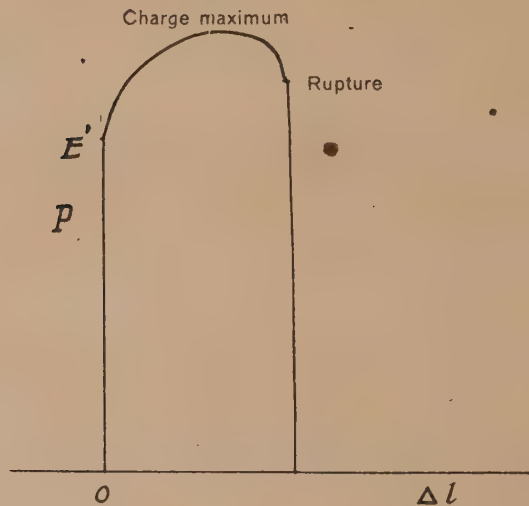


Figure a. — Type de diagrammes de traction

2. Limite élastique vraie.

Les éléments constituant de l'acier (ferrite, perlite, cémentite, etc.) n'opposent pas tous la même résistance à la déformation. Il peut donc exister plusieurs « limites », correspondant, chacune, au début des déformations permanentes d'un élément.

« La limite élastique vraie » serait celle qui correspond au début de la déformation de l'élément le moins résistant.

La transformation moléculaire du métal, sous l'influence de la traction, s'opère ainsi par « paliers », pendant lesquels, les allongements peuvent rester proportionnels aux charges.

Dans ce cas, la limite élastique vraie serait inférieure à la limite de proportionnalité.

L'écart entre ces deux limites peut, d'ailleurs, être considérable, même si le métal est formé d'un seul constituant, homogène, lorsqu'il existe des « tensions internes » (acier énergiquement trempé, sans recuit après trempe).

Un tel métal est dans un « état d'équilibre moléculaire » instable et le moindre effort peut déterminer une rupture (tapure).

Mais, la traction semble pouvoir, quelquefois, faire disparaître les tensions internes, sans rupture de la pièce (aciers nickel-chrome). Elle apparaît, alors, comme une amélioration du métal, analogue à celle que produirait un recuit, sans diminuer l'allongement.

La limite élastique vraie peut correspondre : soit, à la transformation du constituant le moins résistant, soit à la disparition des tensions internes. Dans tous les cas, elle paraît utile à connaître.

3. Palier de la charge.

Après la limite élastique apparente, la charge peut varier d'une façon irrégulière, pendant un certain temps, avant de remonter d'une façon régulière. Cette période de discontinuité, qui s'appelle « le palier », correspond à une transformation moléculaire du métal s'opérant par à-coups et déterminant ainsi de véritables secousses du barreau, lequel donne l'impression qu'il va se rompre.

4. Charge de plasticité.

La fin du palier correspond à un état moléculaire relativement stable du métal. La charge correspondante nous a semblé une caractéristique du métal, au même titre que la limite élastique; nous l'avons appelée « charge de plasticité » et désignée par P_l (fig. a, type A).

En réalité, le métal n'est pas devenu plastique puisque la charge unitaire continue à augmenter. Mais, les glissements moléculaires, qui déterminent cette

augmentation, s'opèrent régulièrement et uniformément dans toute la masse du barreau. P_l se confond souvent avec E_l , mais peut aussi lui être notablement supérieure (aciers durs, recuits).

5. Charge maximum.

Avant de descendre, la charge totale peut stationner plus ou moins longtemps, à son maximum; mais la charge unitaire continue à monter puisque la section du barreau diminue.

6. Striction.

Après que la charge a passé par un maximum, le barreau s'étrangle dans une certaine région, fait que l'on appelle « la striction ».

Dans la plus petite section du barreau, la rupture unitaire peut continuer à croître (même si la charge totale commence à baisser) jusqu'à ce qu'elle ait atteint son maximum, correspondant à la « cohésion » du métal essayé. A partir de ce moment, le métal est « plastique », dans la plus petite section, seulement, et la charge totale décroît comme cette dernière.

7. Écrouissage.

Toute traction exercée sur un barreau, au delà de sa limite élastique, produit une déformation moléculaire permanente du métal appelée « écrouissage ». La limite élastique du métal écroui est égale à la charge maximum qui a été supportée par le barreau, chargé que nous appelons « charge d'écrouissage ».

8. Insuffisance de l'essai ordinaire de traction.

La détermination de la limite élastique est basée sur la proportionnalité de la charge à l'allongement, pendant la période de traction, dite élastique. Or, les lois de l'Elasticité peuvent ne pas être toujours applicables à l'acier qui est une matière ni homogène, ni isotrope; de plus, ces lois, établies en ne considérant que des efforts statiques, sont discutables lorsqu'il s'agit d'efforts dynamiques, comme ceux de la traction ⁽¹⁾; enfin, les transformations moléculaires du métal qui produisent « le palier » ne sont pas toujours indiquées, ainsi que « la charge de plasticité », correspondant à la transformation du constituant le plus résistant.

(1) Un effort p , appliqué à un barreau, ne produit pas instantanément toutes les déformations qu'il est susceptible de produire et il en résulte qu'une vitesse trop grande peut donner une limite élastique trop élevée, surtout avec un métal résistant.

Pour ne pas compliquer les essais de traction, cette vitesse a été uniformisée pour tous les métaux; elle est telle que la traction d'un barreau réglementaire, ayant 120 mm. de longueur entre ses têtes et donnant 30 mm. d'allongement, demande douze à quinze minutes.

Cette vitesse convient bien à l'essai magnétique, exécuté avec des barreaux réglementaires. Une vitesse plus faible ne produirait pas des phénomènes magnétiques suffisamment accusés pour être commodément enregistrables.

9. Nécessité d'une détermination plus scientifique de la limite élastique.

L'essai ordinaire de traction ne peut pas permettre la détermination de la limite élastique vraie. Celle-ci nous a paru possible par un procédé basé sur la variation de la conductibilité électrique ou de la perméabilité magnétique du métal.

La conductibilité semble obéir à des lois relativement simples; mais, les difficultés d'isoler électriquement un barreau d'une machine à traction sont grandes.

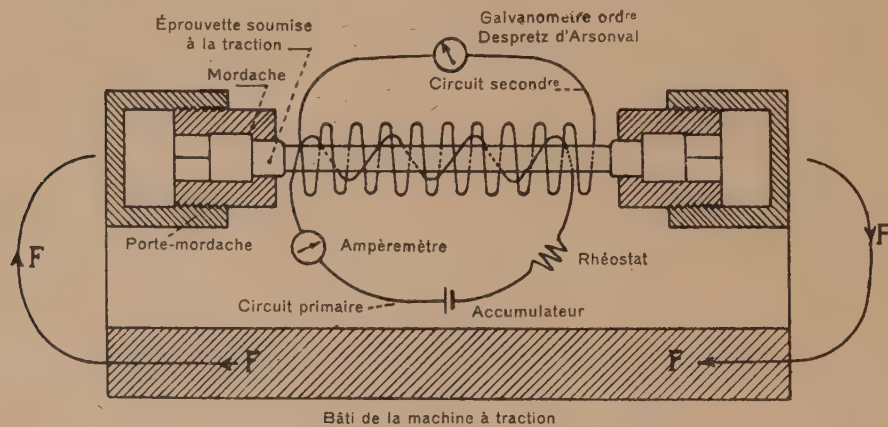
Les phénomènes magnétiques sont, toujours, très compliqués; mais, les difficultés de la technique expérimentale nous ont paru moindres.

CHAPITRE II

ESSAI MAGNÉTIQUE

10. Dispositif expérimental et principe de la méthode employée.

Le barreau, tractionné ou déchargé avec une vitesse constante, est utilisé comme noyau d'une bobine comprenant deux enroulements : un primaire, relié à un accumulateur et un secondaire, relié à un galvanomètre à enregistrement photographique (*fig. 1*).



Bâti de la machine à traction

Fig. 1. — Dispositif des essais

F, Lignes de force du circuit magnétique qui se ferme par le barreau et le bâti de la machine à traction

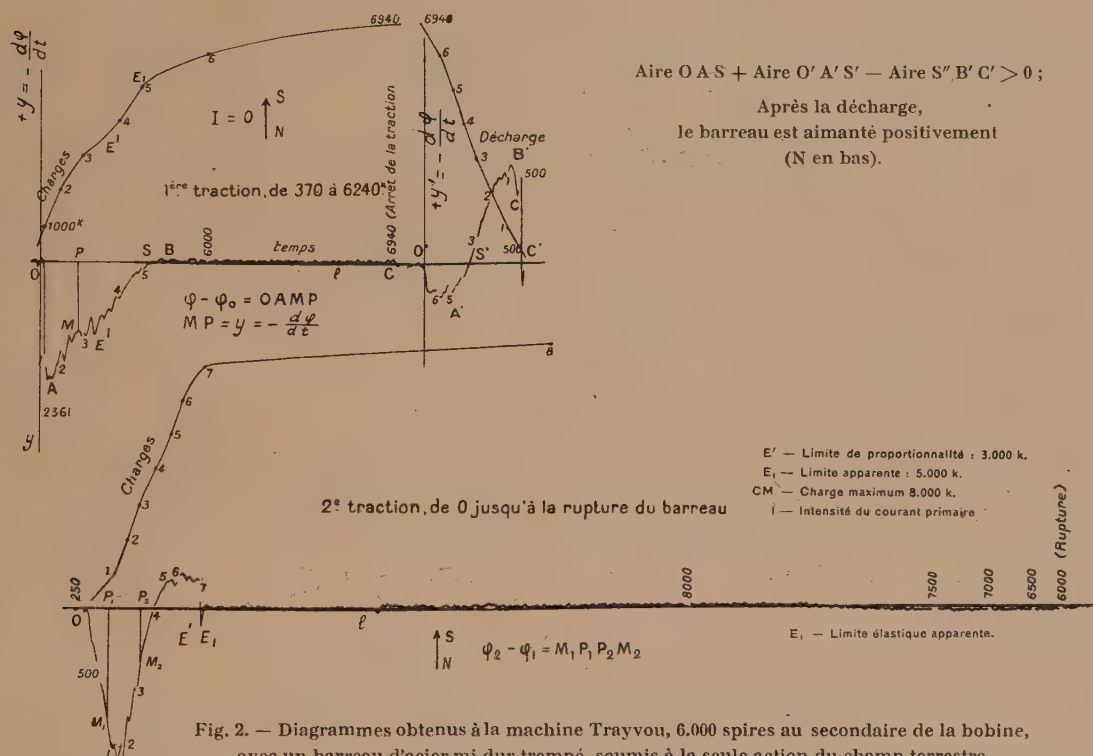
A l'instant t , le barreau est parcouru par un flux φ qui se ferme par le bâti de la machine à traction. Dans le temps dt , ce flux varie de $d\varphi$, d'où production d'une force électromotrice et déplacement du « spot », proportionnel à $\frac{d\varphi}{dt}$ sur la règle du galvanomètre.

Dans nos calculs, ce déplacement est désigné par y , pendant la traction et par y' , pendant la décharge.

Sur une machine verticale, les connexions de l'accumulateur avec le primaire de la bobine sont établies de façon à obtenir un pôle N en bas et un

pôle S en haut du barreau, c'est-à-dire un flux orienté comme la composante verticale du champ terrestre, dans notre hémisphère.

Les connexions du secondaire de la bobine avec le galvanomètre sont toujours établies de façon qu'une augmentation du flux produise un déplacement du spot à gauche ⁽¹⁾ et inversement (*fig. 2*).



Les abscisses, qui figurent les temps ⁽²⁾, sont enregistrées par le mouvement d'horlogerie de l'appareil qui produit le déplacement du papier.

Le circuit de la lampe du galvanomètre comporte un interrupteur permettant d'éteindre la lumière à volonté, au cours de l'essai et d'indiquer ainsi, par des points blancs, les charges remarquables de l'essai ordinaire de traction.

Nos diagrammes portent également les charges de 1.000 en 1.000 kg., à l'aide desquelles on peut construire, par points, le diagramme des charges en fonction du temps, ainsi que nous l'avons fait (*fig. 2*).

(1) Porté vers le bas, dans toutes nos figures.

(2) Une aire, située au-dessous de l'axe des temps, correspond à une augmentation du flux et inversement.

On remarque que ce diagramme est sensiblement linéaire, pendant la période élastique, à partir du moment où le barreau est bien en prise par les mordaches de la machine (entre 1 et 6 tonnes, à la deuxième traction). La charge varie donc proportionnellement au temps et comme elle varie également proportionnellement à l'allongement élastique (*fig. a*, type B), il en résulte que ce dernier, qui est égal au déplacement de la mordache mobile, est proportionnel au temps. Mais, tandis que la droite qui représente la charge en fonction de l'allongement élastique est sensiblement verticale, celle qui représente la charge en fonction du temps est franchement inclinée. La raison de cette différence est la suivante.

Pendant la période élastique, la machine et le barreau forment un ensemble qui se déforme élastiquement, et c'est la machine qui supporte la plus

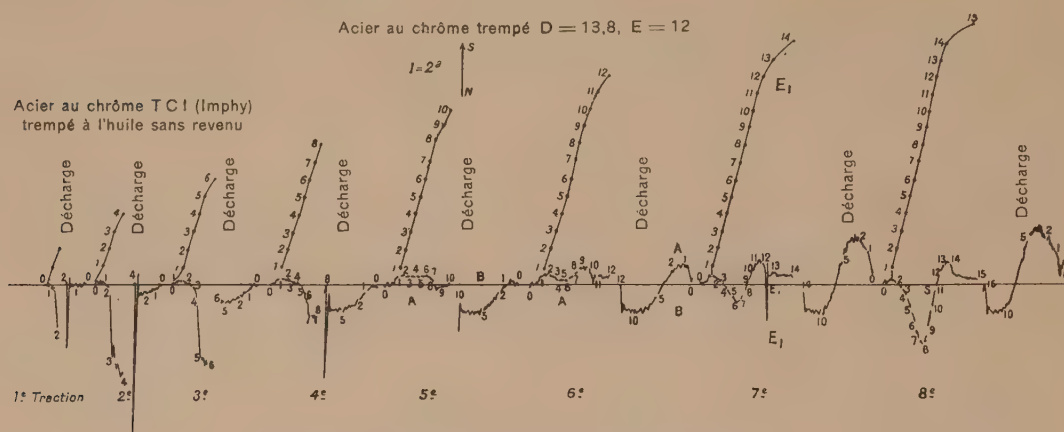


Fig. 3. — Diagramme obtenu avec la machine « Trayvou ».
A, Aimantation négative (N en haut) ; B, Aimantation positive (N en bas).

grande partie de la déformation totale du système (environ les 9/10, sur nos machines).

Pendant la période d'écrouissage, c'est, au contraire, le barreau qui supporte la presque totalité de la déformation du système.

Ces faits sont mis en évidence en plaçant les pointes d'un compas sur deux coups de pointeau, faits sur le barreau. Jusqu'à la limite élastique, on ne voit pas bouger les coups de pointeau, car l'allongement élastique total du barreau ne dépasse jamais quelques dixièmes de millimètre; mais, dès que la limite élastique est atteinte, les coups de pointeau s'écartent visiblement et régulièrement.

Nous avons vu employer, dans quelques usines, ce procédé rudimentaire de détermination de la limite élastique.

Il résulte de ces faits que l'échelle des abscisses est environ dix fois plus grande, pendant la période élastique que pendant celle d'écrouissage, lorsqu'on

mesure les allongements sur nos diagrammes établis en fonction du temps. Mais, dans l'intervalle de chaque période, le temps peut représenter l'allongement, mesuré à l'échelle qui convient.

Au passage des deux périodes, le temps ne représente plus l'allongement et la variation du flux est discontinue, tant par suite des réactions élastiques de la machine que de la transformation moléculaire du barreau (*fig. 3*, 7^e traction point E_1).

La portée de nos diagrammes ne paraît pas, en général, compromise par la déformation élastique de la machine, qui est toujours linéaire.

11. Vibrations du barreau pendant la traction.

Les machines, dans lesquelles le déplacement de la mordache mobile résulte d'engrenage, déterminent une vibration du barreau, qui se traduit par

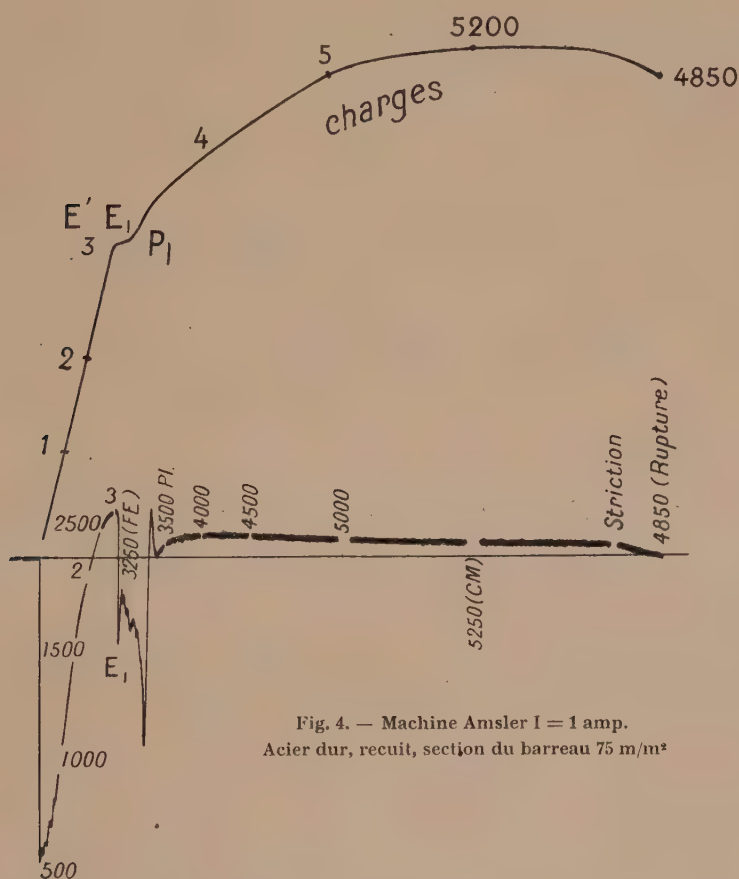


Fig. 4. — Machine Amsler $I = 1$ amp.
Acier dur, recuit, section du barreau 75 m/m^2

une forme tremblée du diagramme d'aimantation, aussi bien à la décharge qu'à la traction (*fig. 2*).

Les machines hydrauliques donnent, au contraire, un trait continu dans les régions du diagramme correspondant à une variation continu du flux (*fig. 4*).

La forme tremblée des courbes de la *figure 2* n'est pas due à une trépidation du sol, car les deux machines sont placées l'une à côté de l'autre et les diagrammes 2 et 4 ont été obtenus avec le même galvanomètre.

L'amplitude des flèches, dans un diagramme tremblé, dépend de la nature et surtout du traitement du métal essayé. Un acier énergiquement trempé (*fig. 1*) donne des flèches beaucoup plus accusées que le même métal recuit (*fig. 9*).

Ces flèches, dues aux réactions élastiques du bâti de la machine (réactions qui se produisent pendant toute la durée de l'opération), ne doivent pas être confondues avec les déplacements brutaux du spot, durant le palier de la charge (*fig. 4*, entre 3.000 et 3.500 kg.).

Ces derniers sont bien la conséquence d'un changement de structure moléculaire du métal, car ils se produisent également avec toutes les machines et sont beaucoup plus accusés chez un acier recuit que chez le même métal trempé, contrairement aux flèches résultant des vibrations du barreau.

12. Influence de la grandeur de la force magnétisante.

La grandeur du premier maximum de y dépend, en général, de celle de la force magnétisante employée; mais la charge correspondant à ce maximum semble en être indépendante, dans tous les cas que nous avons étudiés.

Les trois barreaux de la *figure M* donnent un maximum, vers la charge de 5.500 kg. Ce maximum est nul pour le barreau soustrait au primaire de la bobine; notable, pour le barreau II; plus grand que le précédent pour le barreau III.

Les trois barreaux de la *figure M'* donnent un maximum aux charges respectives de 3.830, 3.540, 3.300 kg. Il n'y a pas lieu de s'étonner de ces écarts, qui sont d'ailleurs relativement faibles, étant donné que nous avons affaire à un acier moulé, par conséquent, peu homogène. Ce maximum est : négatif pour le premier barreau qui s'aimante pendant toute la durée de la traction; positif et notable pour le deuxième barreau, aimanté par un courant primaire de 1 amp. 2 ⁽¹⁾; un peu plus faible que le précédent, pour le troisième barreau, moins aimanté que le second, car l'action du primaire est diminuée de celles du magnétisme rémanent de la machine et du champ terrestre.

(1) Un barreau commence à se désaimanter (y positif) pour une charge d'autant plus faible que son aimantation initiale est plus grande. Si cette aimantation est suffisante, le barreau peut se désaimanter dès le début de la traction.

Le minimum de y , dépendant de l'aimantation initiale du barreau, ne paraît donc pas présenter un grand intérêt, tout au moins chez les aciers très sensibles à l'influence de la force magnétisante (aciers ordinaires recuits ou modérément trempés).

Pour la même raison, la valeur du maximum (qui peut être positif ou négatif) est peu intéressante et il n'y a que la charge correspondante qui le soit parce qu'elle est une caractéristique du métal.

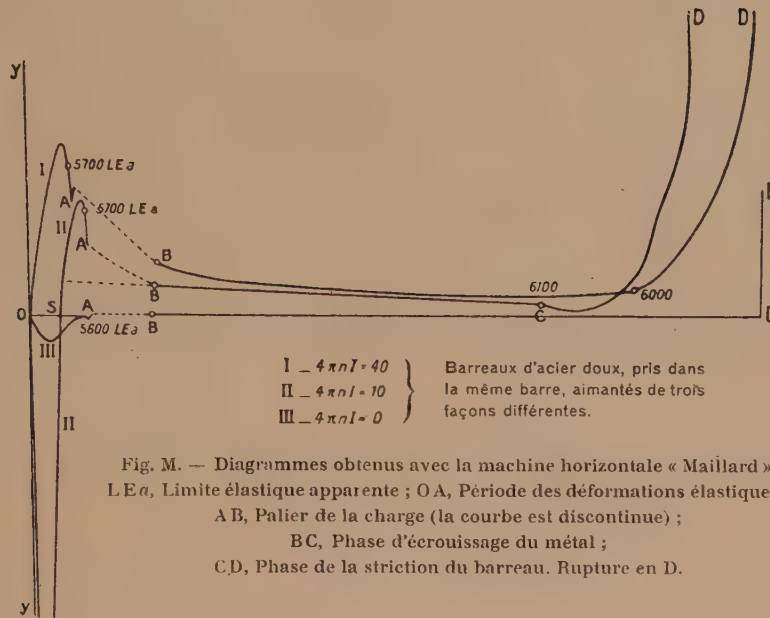


Fig. M. — Diagrammes obtenus avec la machine horizontale « Maillard »
 LEa, Limite élastique apparente ; OA, Période des déformations élastiques ;
 AB, Palier de la charge (la courbe est discontinue) ;
 BC, Phase d'écroutissage du métal ;
 CD, Phase de la striction du barreau. Rupture en D.

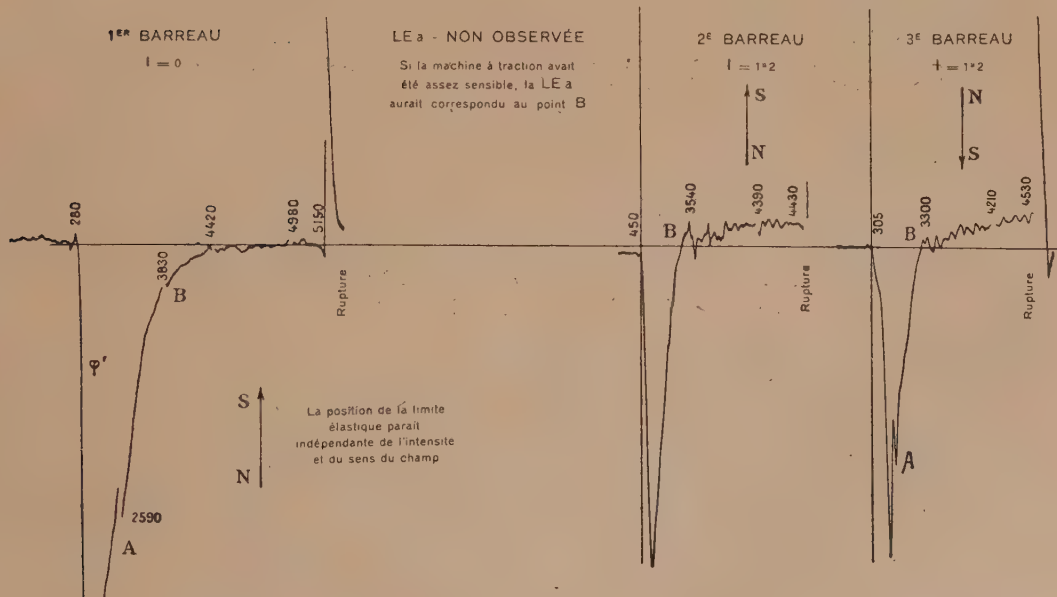


Fig. M'. — Limite élastique. Influence de l'intensité du champ. Barreaux pris dans une pièce de moulage

Le crochet A, observé avec les premier et troisième diagrammes de la *figure M'* doit être attribué à la disparition de l'entrefer, dont l'influence est évidemment d'autant plus grande que la force magnétisante est plus faible.

Le champ créé par le primaire de la bobine est sans influence sensible sur un barreau très aimanté par une traction préalable, lorsque la force coercitive du métal est grande.

C'est ainsi que le barreau de la *figure T* donne exactement les mêmes diagrammes de charge et de décharge : soit qu'on donne un courant primaire de 2 ampères; soit qu'on supprime ce courant. La raison est que la forme des diagrammes dépend de l'aimantation initiale du barreau, laquelle n'augmente pas, en général, comme la force magnétisante et il en résulte que l'influence de cette dernière est d'autant plus faible que la force coercitive du métal est plus grande.

13. Causes de la variation du flux pendant la traction ou la décharge d'un barreau.

Ces causes sont au nombre de trois :

1^o Variation de l'entre-fer qui existe entre les têtes du barreau et les mordaches de la machine à traction. Son influence est d'autant plus grande que la force magnétisante est plus faible;

2^o Variation de la section du barreau ⁽¹⁾. Son influence est négligeable, pendant la période élastique, tandis qu'elle est prépondérante pendant la période d'écroutissage;

3^o Modification de la structure moléculaire du métal essayé, pendant toute la durée des opérations.

L'analyse d'un diagramme, obtenu à l'aide de notre dispositif, ne peut être tentée avant d'avoir déterminé la part qui revient à chacune de ces trois causes. Nous commençons donc par étudier le cas le plus simple, celui d'un barreau qui ne subit que des déformations élastiques et pour lequel l'entre-fer a été supprimé.

14. Aimantation d'un barreau écrouti.

Considérons un barreau, tractionné au delà de sa « charge de plasticité », puis presque complètement déchargé. Les effets produits sur le barreau, par cette traction préalable, sont les suivants :

1^o Le métal a pris une structure « homogène », en ce sens que les déformations moléculaires se produisent uniformément dans toute sa masse, lorsque la traction a été arrêtée;

(1) La plupart de nos essais ont été faits en employant des barreaux de 150 mm² de section initiale, laquelle correspond à un diamètre de 13 mm. 8.

2° La limite élastique a été élevée jusqu'à la charge d'arrêt si l'hystérésis élastique est négligeable et jusqu'à une charge inférieure à la charge d'arrêt, si cette hystérésis a une valeur notable;

3° Les têtes du barreau se sont appliquées complètement contre leurs mordaches, de façon à faire, pour ainsi dire, corps avec elles et il en résulte que le barreau forme, avec la machine, un circuit magnétique fermé, *sans aucun entrefer*.

4° Le barreau, qui a été soumis au primaire de la bobine, est aimanté ainsi que les mordaches.

Le primaire étant supprimé après la traction préalable, le flux n'est plus déterminé que par l'aimantation du barreau, celle des mordaches et le champ terrestre qui ajoute son action aux deux autres.

L'intensité de ce flux est toujours suffisante pour donner des diagrammes très nets lorsqu'on soumet le barreau à une nouvelle traction, puis à une nouvelle décharge, cette dernière étant obtenue en faisant tourner, en sens inverse, le moteur de la machine à traction.

15. Forme des diagrammes.

Les diagrammes de traction et de décharge, ainsi obtenus, sont, en général, de l'un des types représentés par les *figures T et R*.

Diagrammes du type T. — La courbe obtenue à la traction est située, tout entière, au-dessous de l'axe des temps : *le barreau s'aimante constamment à la traction*.

La courbe obtenue à la décharge est située, toute entière, au-dessus de l'axe des temps : *le barreau se désaimante constamment à la décharge* (aciers trempés).

Entre la fin de la traction et le commencement de la décharge, il s'écoule un certain temps, représenté par le palier Z, pendant lequel la charge et, par suite, le flux ne varient pas ($y = 0$).

L'extrémité F de la partie courbe du diagramme de traction correspond à l'ouverture du commutateur ⁽¹⁾ lorsque la charge de 25 tonnes est atteinte; le commencement F' du palier 2 indique l'arrêt complet du moteur. Ces deux points sont réunis par une droite inclinée.

Le point X correspond à la mise en marche du moteur, en sens inverse du précédent. Cette pointe étant dirigée vers le bas, le flux croît un instant avant de se mettre à décroître régulièrement. Cette augmentation du flux semble due à

(1) La machine à traction est actionnée par une dynamo, mise en marche par la fermeture d'un commutateur. La machine Trayvou, qui est à engrenages, permet d'obtenir des diagrammes de décharge; la machine hydraulique Amsler ne le permet pas.

la réaction brutale du bâti de la machine et la pointe X dirigée en sens inverse, observée sur les diagrammes de décharge du type R corrobore cette hypothèse.

D'ailleurs, la charge subit la même « oscillation » que le flux. Or, nous verrons qu'au maximum de y à la traction, lequel correspond au minimum de y à la décharge, l'effort et le flux varient parallèlement.

Diagrammes du type R. — Les diagrammes de traction et de décharge coupent l'axe des temps en des points pour lesquels le flux passe par un maximum puisque sa dérivée s'annule : à la traction et à la décharge, *le flux est d'abord croissant, puis décroissant*. La partie positive du diagramme de traction correspond, sensiblement, au même intervalle de charges que la partie négative du diagramme de décharge (aciers recuits).

ANALOGIE ENTRE LES DEUX TYPES DE DIAGRAMMES

La forme générale des diagrammes, considérés indépendamment de l'axe des temps, est sensiblement la même.

Les diagrammes de traction ont toujours un minimum situé au-dessous de l'axe des temps; les diagrammes de décharge ont toujours un maximum situé au-dessus de l'axe des temps.

Les deux types ne diffèrent que par le signe de l'ordonnée à la fin de la traction ou au début de la décharge.

Les diagrammes du type R ont, en général, un maximum à la fin de la traction; ceux du type T n'ont pas ce maximum, mais la tangente à la courbe tend, néanmoins, à devenir horizontale.

16. Aimantation à la décharge d'un barreau écroui ou non écroui à la traction.

La forme générale des diagrammes de décharge, considérés indépendamment de l'axe des temps, est sensiblement constante, quel que soient la nature du métal essayé, l'aimantation initiale et la charge supportée par le barreau au début de la décharge ⁽¹⁾.

Tant que la limite élastique n'a pas été dépassée à la traction, le diagramme reste, tout entier, au-dessous de l'axe des temps (*fig. 3*, cinq premières décharges), ce qui prouve que le barreau s'aimante pendant toute la décharge. Ce fait présente une grande importance, car il montre que l'entrefer ne réapparaît pas, sensiblement, durant toute la décharge.

(1) Dans le cas d'un barreau très écroui par une traction préalable, sans avoir été retiré des mordaches, les diagrammes de traction et de décharge sont sensiblement symétriques. Le minimum et le maximum du diagramme de décharge correspondent au maximum et au minimum de celui de traction (*fig. R*).

Lorsque la limite élastique a été dépassée à la traction, le barreau se désaimante à la fin de la décharge (*fig.* 3, trois dernières décharges). On observe, en général, un crochet, situé vers la fin de la décharge (point C, *fig.* 2 et T), qui semble produit par la formation de l'entrefer, lequel détermine, évidemment, une diminution plus rapide du flux et, par suite, une augmentation de y' .

En somme, quelle que soit l'aimantation initiale du barreau, écroui ou non écroui à la traction, l'aimantation du barreau, à la décharge, ne dépend que du changement de structure du métal essayé, sous l'influence de l'effort, ce que nous traduisons en disant :

Le diagramme de décharge est une image des déformations moléculaires réversibles.

La constance de la forme du diagramme de décharge paraît résulter de la constance des lois de l'Elasticité.

17. Hystérésis magnétique.

L'hystérésis élastique est inappréciable pour la vitesse de traction que nous avons indiquée; mais, il n'en est pas de même pour l'hystérésis magnétique.

Soit : φ et φ' les valeurs que prend le flux, pendant la traction et pendant la décharge sous l'effort p . Ces valeurs seraient égales s'il n'y avait pas d'hystérésis.

Les diagrammes T et R permettent de construire facilement les courbes T *bis* et R *bis* qui représentent la variation du flux en fonction de la charge.

Fig. T bis. — Elle se rapporte au cas le plus simple, celui d'un barreau chez lequel l'aimantation varie toujours dans le même sens, pendant la traction et en sens inverse, pendant la décharge; la longue période élastique facilite les observations et la force exercitive énorme du métal rend les phénomènes d'hystérésis très accusés.

La courbe $\varphi - \varphi_0$ part de 0 et présente un point d'inflexion, à 8 tonnes, correspondant au minimum de y . La courbe $\varphi' - \varphi_0$ se confond, d'abord, avec la verticale, car la production d'un entrefer, au moment où la charge va être nulle, rétablit brusquement l'état initial (1); elle reste toujours au-dessus de la première et présente un point d'inflexion, à 5 tonnes, correspondant au maximum de y' .

S'il n'y avait pas d'hystérésis, la variation du flux serait représentée par une seule et même courbe, pour la traction et pour la décharge, située entre les

(1) Une nouvelle traction, faite quelques secondes après la première, donne les mêmes diagrammes de traction et de décharge, ce qui prouve que le barreau revient rapidement à son état magnétique initial, après avoir été déchargé.

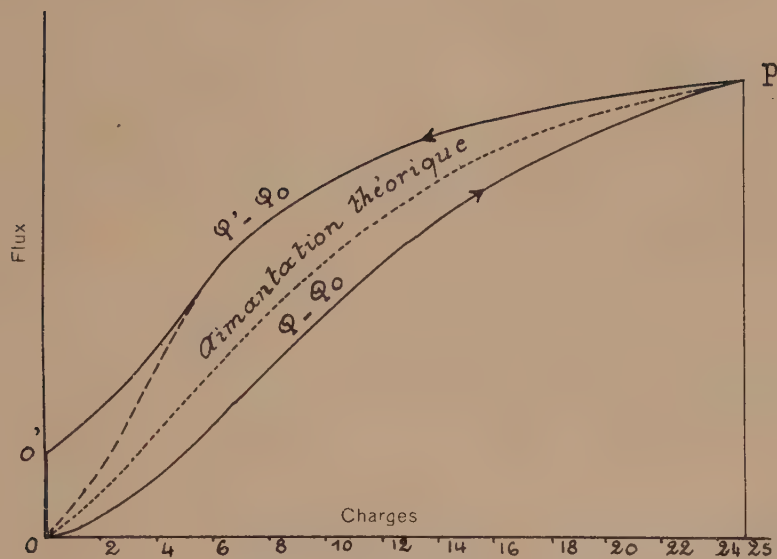


Fig. T bis. — OPO'O. — Cycle représentant l'hystérésis magnétique d'un barreau énergiquement trempé.

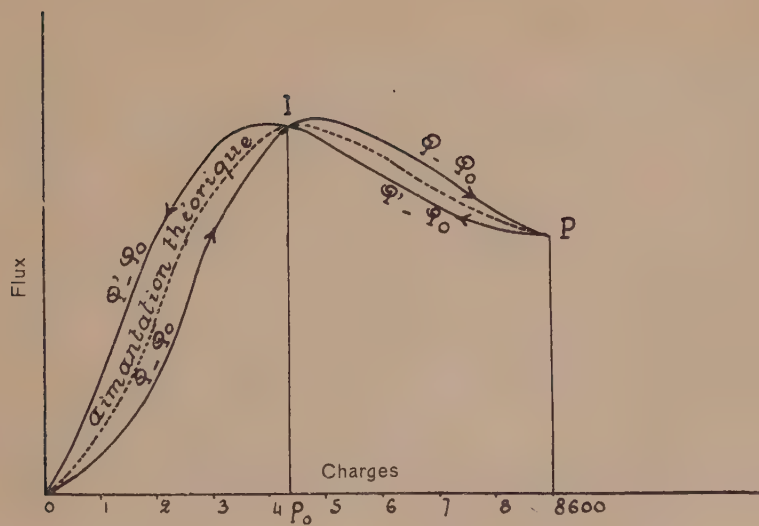


Fig. R bis. — OIPIO — Cycle représentant l'hystérésis magnétique d'un barreau recuit

deux autres. Cette courbe hypothétique est représentée en pointillée. La comparaison des trois courbes montre que :

1° L'hystérésis retarde l'aimantation du barreau, pendant la traction et sa désaimantation, pendant la décharge;

2° Le retard à l'aimantation part de 0, passe par un maximum puis redevient nul, à la fin de la traction; le retard à la désaimantation est nul, au début de la décharge ⁽¹⁾.

Fig. R bis. — Elle se rapporte au cas le plus général, celui d'un barreau chez lequel l'aimantation est croissante puis décroissante, pendant la traction et pendant la décharge.

Le barreau, pris comme exemple, est en acier mi-dur, recuit, soumis préalablement à un certain nombre de tractions jusqu'à sa charge maximum, qui l'on rendu « parfaitement élastique »

L'égalité des aires de traction et de décharge prouve qu'à la fin de la décharge, le barreau a repris son aimantation initiale.

La courbe $\varphi - \varphi_0$ part de 0, présente un point d'inflexion à 2 tonnes, correspondant au minimum de y et un maximum, entre 4 et 5 tonnes, correspondant au point où y s'annule ($\frac{d\varphi}{dp} = 0$).

La courbe $\varphi' - \varphi_0$ part également de 0, présente un point d'inflexion à 1 tonne, correspondant au maximum de y' et un minimum à 4 tonnes, au point où y' s'annule ($\frac{d\varphi'}{dp} = 0$).

Les courbes $\varphi - \varphi_0$ et $\varphi' - \varphi_0$ se coupent en un point I, correspondant à une charge p_1 , voisine de 4 tonnes, pour laquelle on a :

$$\varphi = \varphi'.$$

La courbe moyenne, tracée en pointillée, semble représenter sensiblement ce que serait la variation de l'aimantation du barreau en fonction de l'effort, pendant la traction et pendant la décharge, s'il n'y avait pas d'hystérésis.

On voit que le point I est situé entre les maxima des courbes $\varphi - \varphi_0$ et $\varphi' - \varphi_0$, maxima qui ont lieu pour des charges très rapprochées. Il en résulte sensiblement que : pendant la traction, l'aimantation est retardée jusqu'à la charge p_1 , puis la désaimantation est retardée à partir de cette charge; pendant la décharge, l'aimantation est également retardée jusqu'à p_1 , puis la désaimantation, jusqu'à la décharge complète du barreau.

En somme, l'hystérésis magnétique est la cause de la faible dissymétrie qui existe entre les diagrammes de charge et de décharge que, dans une première approximation, nous avons pu décrire comme symétriques.

(1) Dans le cas d'une variation cyclique de la charge, sans entre-fer, le retard à la désaimantation serait nul à la fin de la décharge (*fig. T bis*, courbe en traits interrompus).

CHAPITRE III

CAS GÉNÉRAL DE L'AIMANTATION A LA TRACTION

18. Période élastique.

Le diagramme de traction d'un barreau quelconque, dont les têtes n'ont pas été moulées dans les mordaches de la machine par une traction préalable, diffère, en général, par sa forme, de celui de décharge du même barreau.

Cette divergence provient de deux causes absolument distinctes et dont les effets sont successifs. La première est la diminution progressive de l'entrefer jusqu'à sa complète disparition; la seconde est la *formation* de « déformations permanentes », pouvant intéresser les dimensions du barreau ou seulement la structure moléculaire du métal, déformations qui sont inappréciables chez un barreau très écroui, ainsi que pendant la décharge d'un barreau qui a été soumis à un effort quelconque.

19. Disparition de l'entrefer.

Les mordaches et les têtes du barreau ayant le même profil, on conçoit qu'un gros effort ne paraît pas, en général, nécessaire pour amener la disparition de l'entrefer. Nous admettons qu'elle a lieu avant que la limite élastique soit atteinte ou, au plus tard, à ce moment ⁽¹⁾.

En effet, le métal essayé est, en général, moins dur que celui des mordaches et il en résulte un écrasement des têtes, à la limite élastique. Ce n'est que chez un barreau d'acier dur, énergiquement trempé, qu'un entrefer pourrait subsister; mais, dans ce cas, les déformations permanentes sont insensibles et un tel barreau ne possède pas, à proprement parler, de limite élastique se traduisant par un allongement permanent notable; la réduction du joint se poursuit, d'ailleurs, après la limite élastique, d'une façon lente et progressive sans infuer sensiblement sur la forme du diagramme.

(1) Il ne paraît d'ailleurs pas nécessaire que l'entrefer ait disparu pour que le diagramme soit utilisable, il suffit que cet entrefer diminue régulièrement.

20. Apparition des déformations permanentes.

A partir du moment où l'effet de l'entrefer devient insensible, une divergence notable entre la forme des diagrammes de traction et de décharge ne peut provenir que de déformations permanentes, car cette forme n'est pas modifiée sensiblement par l'hystérésis.

La simple comparaison de ces diagrammes doit donc suffire, en général, pour déterminer le début des déformations permanentes. Elle conduit à la proposition générale suivante :

Les déformations élastiques, seules, étant uniquement fonction de l'effort font varier l'induction du barreau ; les déformations permanentes, n'étant que des glissements moléculaires sans variation de l'effort, ne produisent une variation du flux que par suite de la contraction du barreau qu'elles entraînent.

Cette proposition permet de voir directement, sur le diagramme de traction, la nature des déformations du métal, sans qu'il soit besoin d'avoir recours au diagramme de décharge.

Fig. 2, première traction. — Le crochet de la courbe, situé immédiatement après le chiffre 3, est évidemment produit par une déformation permanente. Pour mieux s'en convaincre, il suffit, d'ailleurs, de remarquer que la courbe des charges en fonction du temps s'infléchit à partir de 3 tonnes, ce qui prouve que les déformations élastiques sont plus lentes. Après le crochet, les déformations permanentes paraissent régulières et faibles, jusqu'à la charge de 5 tonnes, à partir de laquelle elles deviennent très grandes par rapport aux déformations élastiques. Pendant la période d'écrouissage, à partir du point B, la variation du flux est innappréciable ($y=0$), parce que ce flux est très faible, l'aimantation du barreau n'ayant été produite que par les mordaches et le champ terrestre.

Fig. 3, septième traction. — Le crochet de la courbe, situé immédiatement après le chiffre 12, est évidemment produit par une déformation permanente notable. Après la charge de 13 tonnes, les déformations permanentes sont très grandes par rapport aux déformations élastiques et il en résulte que la variation du flux est sensiblement linéaire, comme la contraction du barreau.

Cette variation est appréciable (y est positif et notable) parce que le barreau est très aimanté par le primaire de la bobine.

21. Maximum de la courbe de traction.

On peut admettre qu'un barreau recuit, plusieurs fois chargé et déchargé, a pris une limite élastique égale à sa charge d'écrouissage, qui correspond à la fin de la traction. Or, le diagramme de charge présente, en général, un maximum situé avant la limite élastique : sur les diagrammes de la *figure R*, ce

maximum a lieu vers 7 tonnes, tandis que la limite élastique est toujours voisine de 8.500 kg.

Chez un barreau recuit, non écroui, le maximum a lieu aussi, généralement, *avant la limite élastique apparente* (fig. *M*, où le maximum a lieu vers 5 tonnes, tandis que la limite apparente est voisine de 5.700 kg. sur les trois diagrammes).

Il semble donc que, chez les aciers ordinaires recuits, écrouis ou non écrouis, le diagramme présente généralement un maximum avant la limite apparente, seule limite qui puisse être observée chez ces aciers.

Au contraire, chez un acier énergiquement trempé, ce maximum peut faire défaut (fig. *T*) où se produire à une charge égale ou légèrement supérieure à celle d'écrouissage (fig. *S*, quatrième et cinquième tractions) ⁽¹⁾; mais, dans ce cas, il n'est que le résultat de déformations permanentes notables.

En somme, le maximum de la courbe ne correspond qu'exceptionnellement à la limite de proportionnalité.

22. Expression de la variation du flux.

Pendant toute la période élastique, la section du barreau peut être considérée comme constante. Dès lors, à partir du moment où l'entrefer a disparu, le flux n'est plus qu'une fonction de la charge *p*, supportée par le barreau et on a :

$$y = - \frac{d\varphi}{dt} = - \frac{d\varphi}{dp} \cdot \frac{dp}{dt}.$$

Or, $\frac{dp}{dt}$ est constant, puisque le diagramme des charges en fonction du temps est linéaire.

Ce rapport se calcule facilement à l'aide de nos diagrammes.

Prenons, par exemple, celui de la deuxième traction de la *figure 2*.

Entre 1 et 6 tonnes, le diagramme est sensiblement linéaire et il s'écoule 35 secondes. On a donc :

$$\frac{dp}{dt} = \frac{5 \text{ t.}}{35''} = \frac{1 \text{ t.}}{7''}.$$

La charge augmente régulièrement de 1 tonne toutes les 7 secondes.

L'allongement élastique est de :

$$\frac{120 \times 5}{150 \times 20} = 0 \text{ mm. } 2.$$

(1) 4^e traction. — La charge d'écrouissage est 11 tonnes; le maximum a lieu après.

5^e traction. — La charge d'écrouissage est 13 tonnes, le maximum a lieu après.

En raison de la faible valeur de γ , le maximum de *y* est très faible, et reste sensiblement constant.

Le temps écoulé étant de 35 secondes, on a pour la vitesse d'écartement des mordaches :

$$v = \frac{0,2}{35} = 0 \text{ mm. } 0057.$$

23. Période des petits allongements permanents.

Pendant la période élastique, la fonction $\frac{d\varphi}{dp}$ varie comme y , puisque $\frac{dp}{dt}$ est constant.

Considérons les cas où y passe par un maximum. Nous avons vu qu'il ne

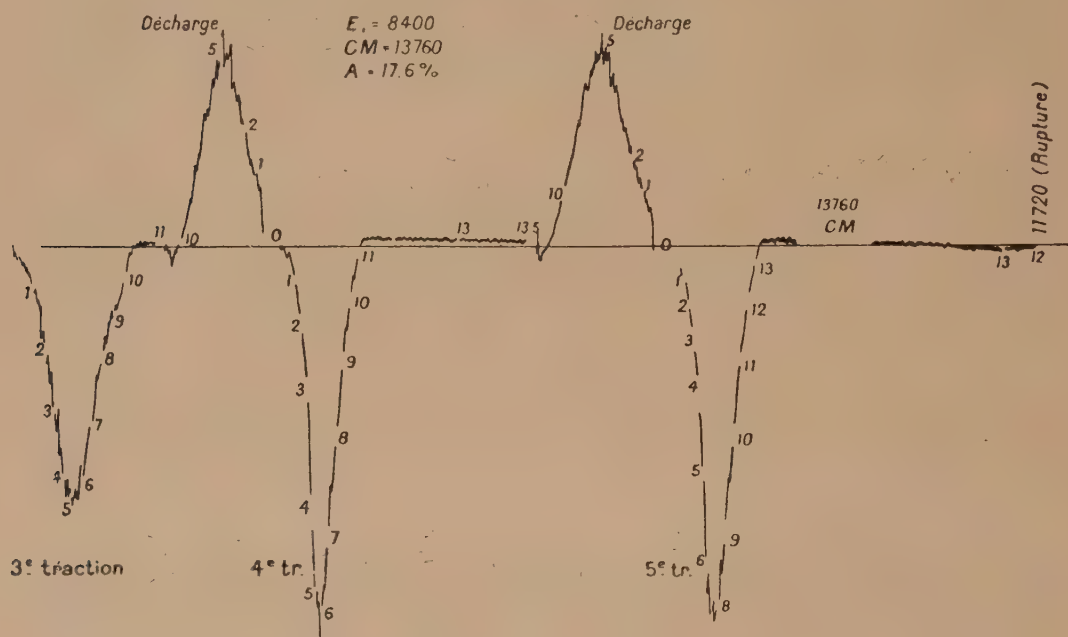


Fig. 8. — Diagrammes obtenus avec un barreau d'acier mangano-siliceux, déjà tractionné au delà de sa limite élastique, soustrait au primaire de la bobine, mais aimanté par les tractions précédentes.

pouvant être situé qu'avant la limite de proportionnalité. Or, à partir de ce maximum, y semble peu varier et il en est de même pour $\frac{d\varphi}{dp}$.

Par exemple, sur le diagramme de la figure 2 (deuxième traction), on voit que y reste sensiblement constant, entre les points 5 et 7; sur les diagrammes de la figure R, il en est de même, entre les points 6 et 8.

On peut encore admettre que, pendant la période des petits allongements,

la section reste constante; nous admettons également qu'il doit en être sensiblement de même pour $-\frac{d\varphi}{dp}$ et que l'on peut écrire :

$$y = K \frac{dp}{dt} :^{(1)}$$

Pendant la période des petits allongements, le flux varie comme la charge ⁽²⁾. — Cette proposition étant admise, il est permis de situer, dans beaucoup de cas, la période des petits allongements, sur les diagrammes d'aimantation, bien mieux qu'on peut le faire généralement sur les diagrammes de traction. C'est, peut-être, le résultat pratique le plus important de l'essai magnétique.

Mais notre proposition ne saurait être admise dans le cas où y ne passe pas par un maximum avant la limite de proportionnalité (*fig. S*), ni même lorsque ce maximum est très éloigné du début des grands allongements (*fig. 6, 8, 12*). Dans ce dernier cas, le maximum de y n'est d'ailleurs que relatif.

24. Limite de proportionnalité.

Pendant la période élastique, les allongements semblent pouvoir rester proportionnels aux charges, sans qu'il y ait, nécessairement réversibilité (aciers énergiquement trempés). La limite de proportionnalité correspond à la fin de la période élastique, pendant laquelle le métal peut subir des déformations moléculaires permanentes.

Les aciers peuvent être rangés en trois catégories, comme nous l'avons déjà fait (*fig. a*), au point de vue de la limite de proportionnalité et de la limite apparente, qui marquent le début et la fin des petits allongements.

Première catégorie : aciers écrouis. — Au point de vue magnétique, ces aciers peuvent être divisés en deux classes.

a) Le maximum de y a lieu *avant la charge d'écrouissage* (aciers ordinaires recuits ou modérément trempés (*fig. 2*, deuxième traction).

La limite de proportionnalité se confond avec la limite apparente et la charge d'écrouissage (point E_1).

b) Le maximum de y a lieu *à la charge d'écrouissage ou après cette charge* (aciers énergiquement trempés et certains aciers spéciaux, même recuits).

Aucun diagramme ne peut donner des indications précises, à cause de l'hystérésis des déformations permanentes. Toutefois, on peut dire que le maximum de y correspond à une charge voisine de la limite de proportionnalité (*fig. S*).

(1) K est indépendant de la charge.

(2) Cette proposition paraît sensiblement vraie à partir du maximum de y .

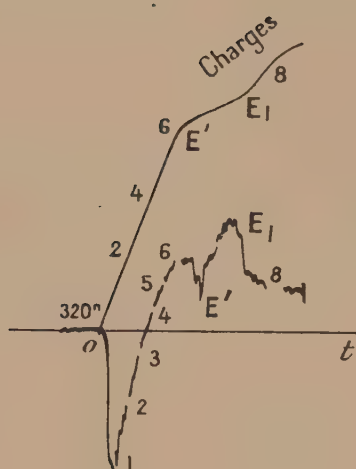


Fig. 5. — Machine Trayvou I = 2 amp.
Acier chrome nickel F 6, double recuit.

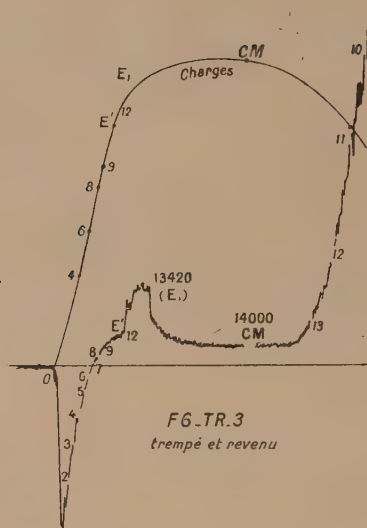


Fig. 7. — Machine Trayvou
Diagramme obtenu avec un acier F6-TR-3,
trempé et revenu.

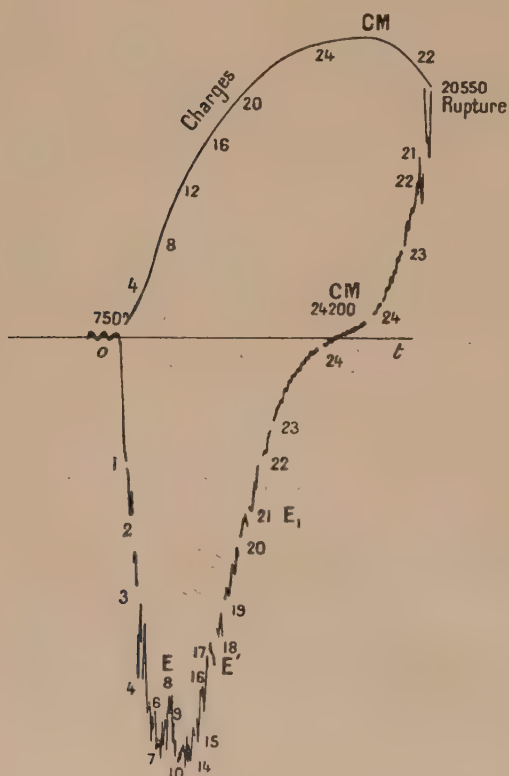


Fig. 6. — Machine Trayvou, I = 2 amp.
Acier chrome nickel 4 DF 2 (auto-trempant)
trempé à l'air, sans revenu.

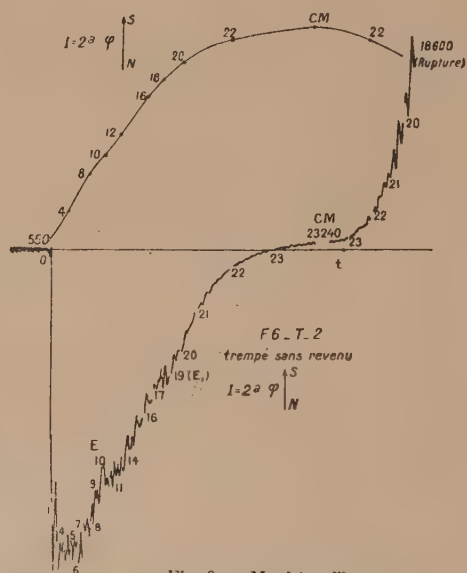


Fig. 8. — Machine Trayvou
Diagramme obtenu avec un acier
F6 - T-2, trempé sans revenu.

Deuxième catégorie : aciers non écrouis, recuits ou modérément trempés.

— La seule différence qui existe entre ces aciers et ceux de la première catégorie

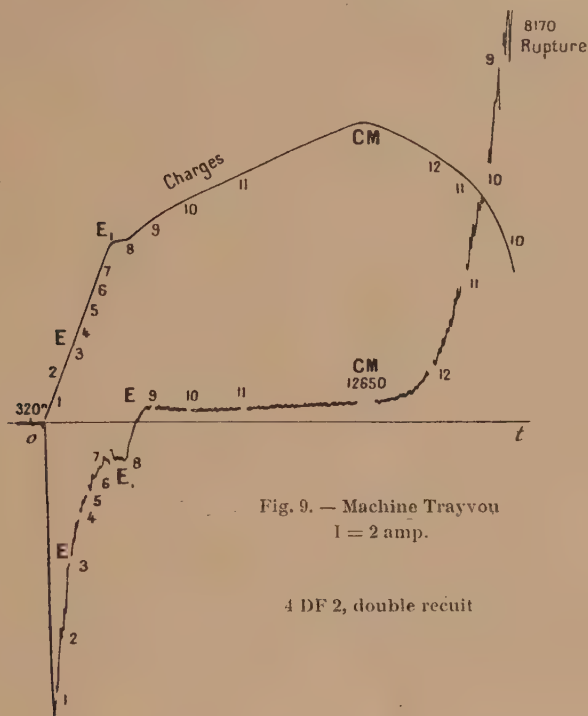


Fig. 9. — Machine Trayvou
I = 2 amp.

4 DF 2, double recuit

réside dans l'importance de la période des petits allongements. La limite de proportionnalité ⁽¹⁾ est déterminée avec la même précision que précédemment,

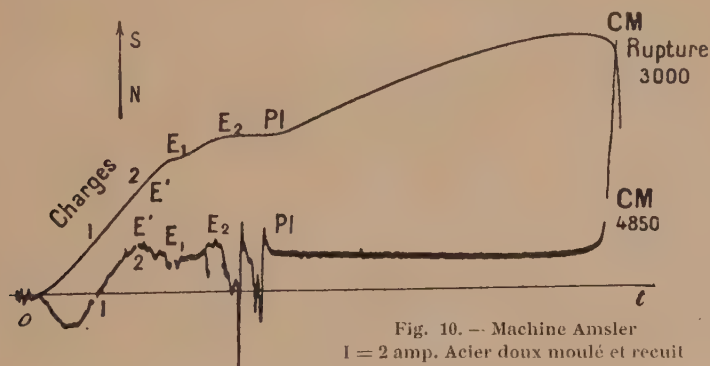
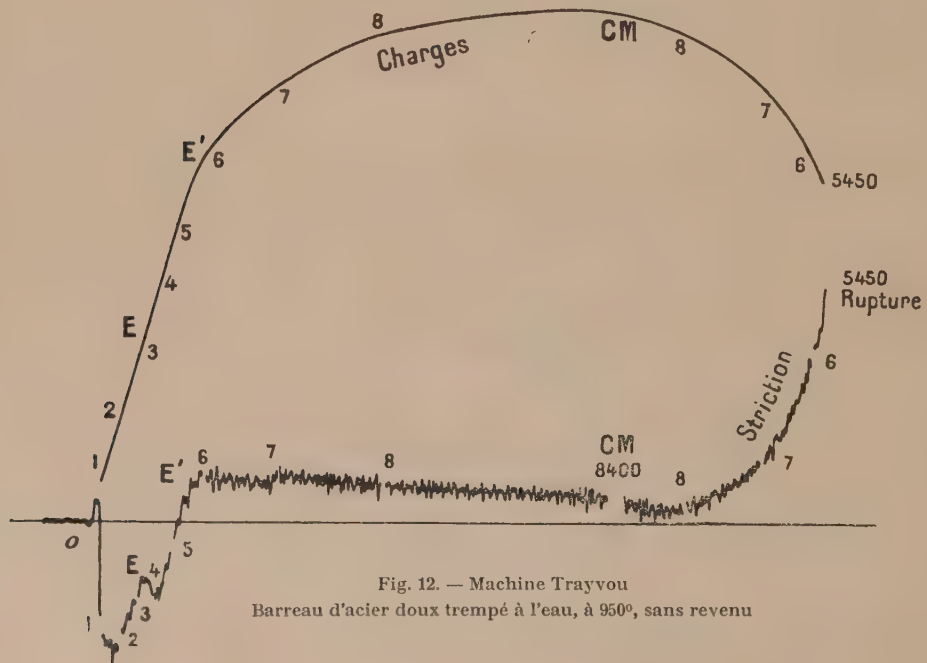
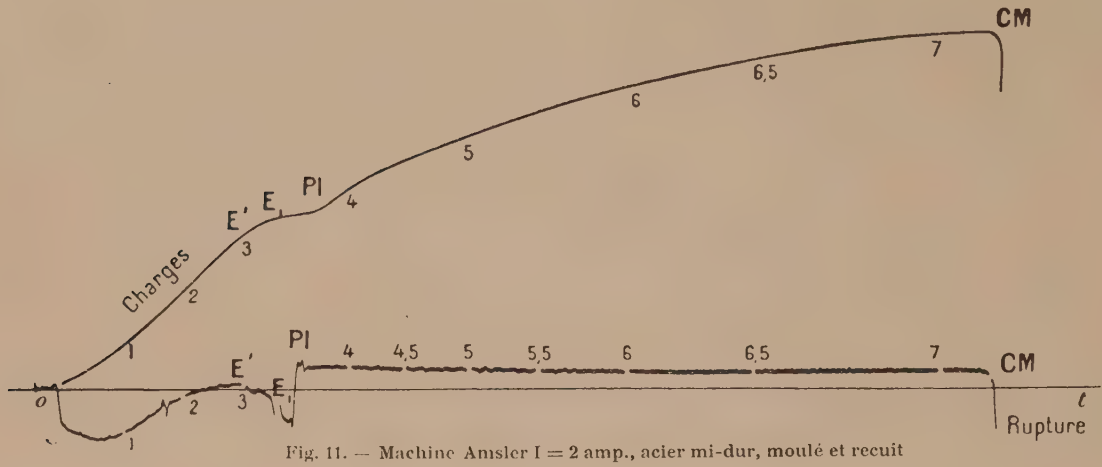
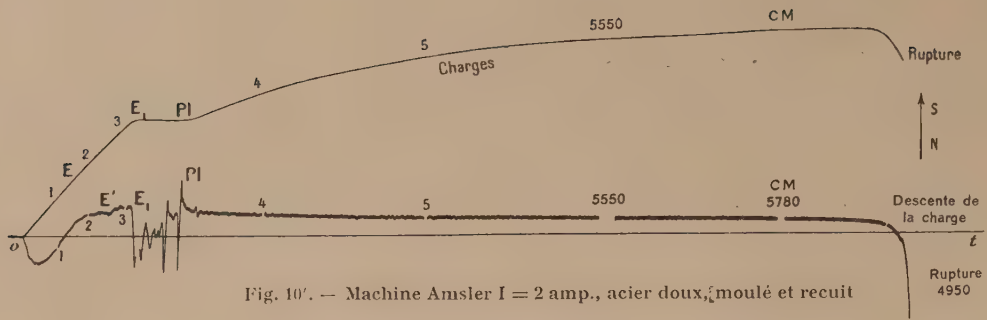


Fig. 10. — Machine Amsler
I = 2 amp. Acier doux moulé et recuit

par les diagrammes d'aimantation : elle correspond, sensiblement, au minimum ou au point d'inflexion qui suit le maximum de la courbe (*fig. 2, 5, 7, point E'*).

(1) Au cas où il existerait une limite élastique vraie, inférieure à la limite de proportionnalité, l'essai magnétique ne paraît pas susceptible de la déterminer.



Troisième catégorie : aciers énergiquement trempés et spéciaux. — Le diagramme ordinaire de traction ne donne jamais aucune indication précise sur la limite de proportionnalité, ni sur aucune limite. Le diagramme magnétique paraît susceptible de donner, quelquefois, la limite élastique vraie, telle que nous l'avons définie. Cette dernière correspond au « cran E », que l'on voit sur certains diagrammes, en pleine période élastique (*fig. 6, 8, 12*).

25. Tableau des limites élastiques.

Sur le tableau suivant, on a donné les trois limites, déterminées comme nous l'avons dit, pour tous les diagrammes figurant dans ce travail. E désigne la

N° des FIGURES	E	E'	E ₁	OBSERVATIONS
2	?	3.000	5.000	La variation brutale de y , au point E ₁ , est de faible amplitude parce que le flux est faible.
3	?	12.000	13.000	La variation brutale de y , au point E ₁ , à une grande amplitude parce que le flux est notable.
4	?	3.000	3.750	Le barreau s'aimante pendant le palier ($y < 0$). C'est généralement une caractéristique des aciers durs, recuits.
5	?	6.500	7.500	Le minimum (LE) qui suit le maximum est bien caractérisé chez les aciers chrome-nickel, recuits.
6	8.000	17.000		Le cran à 8.000 semble provenir de tensions internes, inévitables chez un acier dur trempé.
7	?	12.000	13.420	A la limite de proportionnalité E', le maximum et le minimum sont confondus en un point d'inflexion.
8	10.000	17.000		Même observation que pour le barreau 6, au sujet du cran à 10.000.
9	?	8.000	8.500	La période des petits allongements est nulle, ce qui explique le point anguleux de la courbe.
10	?	2.500	3.000 (E ₁) 3.500 (E ₂)	On observe deux limites apparentes, produites par les soufflures du métal non laminé.
11	?	3.000	3.500	Même observation.
12	4.000	6.000		Même observation que pour 6 et 8, au sujet du cran à 1.000.
M'	?	4.420		La limite élastique est accusée de la même façon que sur le barreau 2.
14	?	5.800	6.100	La limite élastique correspond au point d'inflexion de la courbe.
M	?	5.780	5.780	Chez les trois barreaux de cette figure, la limite élastique est la même. Les trois diagrammes diffèrent par le maximum qui monte en même temps que la force magnétisante.

limite élastique vraie; E' la limite de proportionnalité; E₁, la limite apparente (chez les aciers moulés, l'écrasement d'une soufflure peut provoquer un fléchissement momentané de la charge. Il semble y avoir, dans ce cas, deux ou plusieurs limites apparentes : E₁, E₂).

26. Palier de la charge.

Le palier caractérise tous les aciers ordinaires recuits ou modérément trempés ⁽¹⁾. Pendant le palier, la dérivée du flux est discontinue; celle de la charge l'est également, mais l'inertie de la machine peut empêcher de le voir.

Chez les aciers doux, la charge varie dans les deux sens, pendant le palier. Il en est de même pour le flux dont la dérivée prend des valeurs tantôt positives, tantôt négatives (*fig. 10*).

Chez les aciers durs, la charge augmente pendant tout le palier. Il en est de même pour le flux dont la dérivée est toujours positive (*y* négatif, *fig. 4*).

Dans tous les cas, la variation du flux, pendant le palier, est une image saisissante des déformations moléculaires rapides qui se produisent dans le barreau, déformations que le diagramme des charges permet à peine de soupçonner.

27. Période d'écrouissage.

Dès le début de cette période, la déformation élastique du bâti de la machine devient négligeable par rapport à l'allongement du barreau, qui augmente, dès lors, proportionnellement au temps.

Soit : l , la longueur du barreau, au temps t . On a :

$$y = - \frac{d\phi}{dt} = - \frac{d\phi}{dl} \frac{dl}{dt}$$

$\frac{dl}{dt}$ est constant et proportionnel à la vitesse du moteur qui actionne la machine à traction. En désignant par λ , l'allongement du barreau pendant toute la période d'écrouissage et par T la durée de cette période, on a :

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\lambda}{T} \quad (2)$$

Et, par suite :

$$y = - \frac{\lambda}{T} \frac{d\phi}{dl}$$

(1) Il s'étend toujours de la limite élastique apparente à la charge de plasticité (intervalle $E_1 P_1$).

(2) λ est sensiblement égal à l'allongement du barreau, après sa rupture, car l'allongement élastique est négligeable devant l'allongement permanent. Pour un barreau de 120 mm. entre têtes, donnant 30 % d'allongement, on a :

$$\lambda = 120 \times \frac{30}{100} = 36 \text{ mm.}, \quad T = 12 \text{ minutes}$$

$$v_1 = \frac{\lambda}{T} = \frac{36}{60 \times 12} = \frac{1}{20} = 0 \text{ mm. } 05 :$$

Le barreau s'allonge de 0 mm. 05 par seconde, tandis que, pendant la période élastique, il ne s'allonge que de 0 mm. 0057, soit environ dix fois moins vite.

Soit : B et s, l'induction et la section du barreau, au temps t. On a :

$$\varphi = Bs, \quad \frac{d\varphi}{dt} = s \frac{dB}{dt} + B \frac{ds}{dt}.$$

En admettant que le volume V du barreau reste sensiblement constant, pendant toute la traction, on a :

$$s = \frac{V}{l}, \quad \frac{ds}{dt} = - \frac{V}{l^2} = - \frac{s}{l}.$$

La valeur de y peut donc s'écrire :

$$y = - \frac{\lambda s}{T} \left(\frac{dB}{dt} - \frac{B}{l} \right) = \frac{\lambda s}{T} \left(\frac{B}{l} - \frac{dB}{dp} \frac{dp}{dt} \right).$$

Le premier facteur varie comme la section du barreau, c'est-à-dire décroît suivant une loi sensiblement linéaire; la variation du second facteur, qui dépend de la nature du métal, est plus compliquée.

Pendant la période d'écroutissage, la structure du métal se modifie constamment et régulièrement, par suite des glissements moléculaires permanents; à chaque charge correspond, en quelque sorte, un nouveau métal.

Le second facteur de y, qui peut être positif ou négatif, comprend deux termes pouvant varier dans le même sens ou en sens inverse, en croissant ou en décroissant. Quatre cas se présentent effectivement.

Premier cas. — Le second facteur de y est positif et reste sensiblement constant.

y varie, alors, comme la section du barreau, c'est-à-dire décroît suivant une loi sensiblement linéaire, avec des barreaux de 120 mm. de longueur entre les têtes (fig. 4, 10') :

$$y = v_1 s k = \frac{v_1 V}{l} K = \frac{A}{l}$$

A étant une constante ne dépendant que de l'appareillage (vitesse de traction ⁽¹⁾, bobine, galvanomètre), de la nature et de l'aimantation initiale du métal essayé.

Deuxième cas. — Le second facteur de y est positif et croît notablement.

y peut, alors, rester sensiblement constant (fig. 7 et 10) ou aller légèrement en augmentant (fig. 9). Chez ces barreaux, l'influence de la diminution de l'induction compense ou l'emporte sur celle de la diminution de section.

(1) Nous admettons que la vitesse d'écartement des mordaches est constante et proportionnelle à celle du moteur qui actionne la machine, pendant chacune des deux périodes (élastique et d'écroutissage) considérées isolément. Mais v_1 est toujours plus grand que v (environ dix fois), pour les raisons que nous avons données dans la description de la technique expérimentale (§ 10).

Le passage de v à v_1 ne compromet pas la portée de nos diagrammes à palier. Par contre, chez les aciers sans palier, l'allongement ne saurait être considéré comme proportionnel au temps, pendant la période d'écroutissage, car la déformation de la machine peut être notable, même après la limite élastique.

Troisième cas. — Le second facteur de y est négatif et reste sensiblement constant (*fig. 13*).

Le diagramme se présente à peu près symétriquement à celui que l'on obtient dans le premier cas.

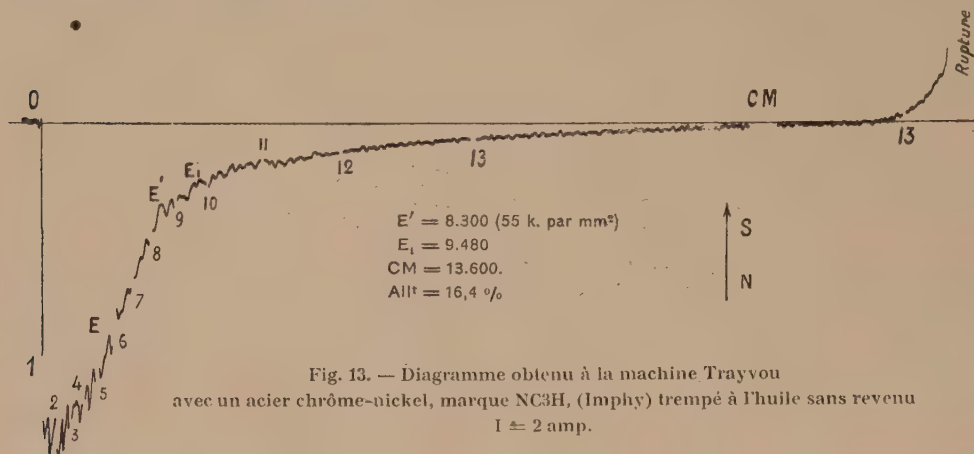


Fig. 13. — Diagramme obtenu à la machine Trayvou avec un acier chrome-nickel, marque NC3H, (Imphy) trempé à l'huile sans revenu $I \approx 2$ amp.

Quatrième cas. — Le second facteur de y est négatif et croît notablement. y croît et peut devenir rapidement positif (*fig. 6 et 8*).

REMARQUE. — Nous n'avons pas envisagé le cas où le second facteur de y était positif et décroissant, ni celui où ce facteur était négatif et décroissant parce que ces derniers cas ne se distinguent pas nettement des cas 1 et 3.

28. Période de striction.

y varie pour deux causes distinctes :

- 1° L'étranglement du barreau qui détermine une augmentation de y ;
- 2° La détente élastique, dans les deux parties du barreau restées cylindriques, qui peut déterminer une diminution ou une augmentation de y .

Si ces deux causes ajoutent leur effet, y augmente régulièrement et plus ou moins rapidement, suivant la nature et l'aimantation du métal (*fig. 6 à 9, fig. T₁*); si elles retranchent leur effet, y peut rester sensiblement constant (*fig. S*) ou diminuer plus ou moins vite (*fig. 4*).

Mais, l'effet de la première cause devient, en général, prépondérant, à la fin de la striction et y augmente rapidement, après avoir passé par un minimum (*fig. 12, fig. M*, deuxième barreau).

29. Rupture.

La variation de y , à la rupture, découle de sa variation à la fin de la striction :

y peut augmenter brusquement; rester sensiblement constant ou diminuer plus ou moins brusquement.

Ce dernier cas se présente généralement chez les barreaux qui cassent sans striction ou avec une striction peu accusée (barreaux moulés ou découpés

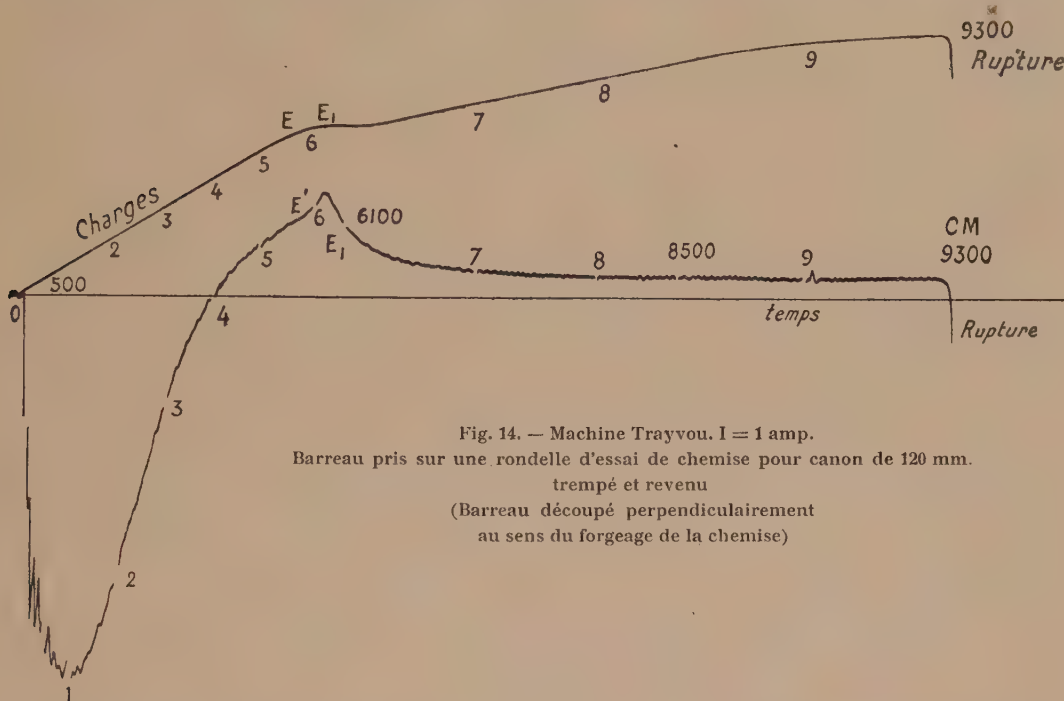


Fig. 14. — Machine Trayvou. $I = 1$ amp.
Barreau pris sur une rondelle d'essai de chemise pour canon de 120 mm.
trempé et revenu
(Barreau découpé perpendiculairement
au sens du forgeage de la chemise)

dans une pièce de moulage (*fig. 10', 11 et M'*); barreaux découpés perpendiculairement au sens du laminage (*fig. 14*).

La variation de y , pendant la striction et à la rupture, dépend de la nature du métal et de son aimantation.

Lorsque le barreau est très aimanté, y est, en général, croissant pendant toute la striction (*fig. M*, premier barreau); lorsque le barreau est moyennement aimanté, y passe généralement par un minimum (*fig. M*, deuxième barreau); lorsque le barreau est peu aimanté, y reste généralement nul (*fig. M*, troisième barreau; *fig. 2*).

RÉSUMÉ DE CETTE ÉTUDE

30. L'aimantation d'un barreau placé dans un champ magnétique constant, varie, lorsqu'il est soumis à la traction.

Un dispositif simple permet d'enregistrer cette variation qui dépend de la

nature des déformations du métal sous l'influence de la traction. Mais, le diagramme ainsi obtenu n'est utilisable qu'à partir du moment où le circuit magnétique, constitué par le bâti de la machine à traction, est complètement fermé, moment qui semble, en général, atteint avant la limite élastique : plus ou moins longtemps avant, chez un barreau qui vient d'être mis en place; dès le début de la traction, chez un barreau écroui par une traction préalable, poussée au delà de sa limite élastique, sans avoir été retiré des mordaches de la machine à traction.

A la décharge d'un barreau, le circuit magnétique paraît toujours fermé, pendant toute la durée de l'opération.

Les diagrammes de traction et de décharge d'un barreau écroui représentent donc les déformations moléculaires du métal. Ils sont de deux types : type T (barreaux trempés), le barreau s'aimante constamment à la traction et se désaimante constamment à la décharge; type R (barreaux recuits), le barreau s'aimante puis se désaimante pendant le cours de sa traction et pendant celui de sa décharge.

Un barreau quelconque ayant été tractionné au delà de sa limite élastique puis déchargé, la comparaison des deux diagrammes permet, en général, de déterminer la nature des déformations moléculaires du métal (élastiques ou permanentes), au cours de l'opération et, partant, la limite élastique, car les effets de l'hystérésis magnétique ne semblent pas modifier sensiblement la forme des diagrammes.

La traction complète d'un barreau a été divisée en quatre périodes, correspondant à celles de l'essai ordinaire de traction.

La période élastique, qui s'applique à la période pendant laquelle les allongements sont proportionnels aux charges, sans qu'il y ait nécessairement réversibilité; elle se termine à la limite de proportionnalité, généralement indiquée, sur le diagramme de traction, par un changement notable de courbure.

La période des petits allongements, pendant laquelle le flux semble varier sensiblement comme la charge.

La période d'écrouissage, caractérisée par une variation sensiblement linéaire du flux.

La période de striction, caractérisée par un changement d'allure dans la variation du flux, changement déterminé par l'étranglement du barreau et la détente élastique des deux parties restées cylindriques.

Issy-les-Moulineaux, le 20 janvier 1926.

L. FRAICHET,

SECONDE THÈSE

Propositions données par la Faculté

INTERCHANGEABILITÉ des PIÈCES FILETÉES

Vu et approuvé :

Strasbourg, le 28 janvier 1932

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

E. ROTHÉ

Vu et permis d'imprimer :

Strasbourg, le 30 janvier 1932

Le Recteur,

Président du Conseil de l'Université,

J. DRESCH

